

POROVNÁNÍ PŘÍSTUPU ČESKÝCH NOREM PRO MĚŘENÍ STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

Tomáš Trtík, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
tomas.trtik@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek informativně porovnává postupy měření statického modulu pružnosti betonu dle platných českých norem pro dva rozdílné způsoby zatěžování. Stanovení modulu pružnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem definuje norma ČSN 73 6174, statický modul pružnosti v tlaku upravují normy ČSN EN 12390-13 a ČSN ISO 1920-10, které vychází z podobného přístupu, ovšem v důležitých parametrech ovlivňujících hodnotu modulu pružnosti se liší. Základní parametry porovnání jsou informace o doporučených zkušebních tělesech, limitní hodnoty přetvoření na jednotlivých čidlech pro vyhodnocení rovnoměrného zatěžování, požadavky na zkušební a měřicí zařízení. Hodnota modulu pružnosti je nejvíce ovlivněna měřicí délkou základny spolu s dolní a horní zatěžovací úrovní. Jsou prezentovány výsledky zjištění spolu s doporučením a možnou úpravou parametrů pro přesnější výsledky hodnot modulu pružnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Modul pružnosti • České normy • Dolní zatěžovací úroveň

ABSTRACT

The article informatively compares the procedures for measuring the static modulus of elasticity of concrete according to the valid Czech standards for two different loading methods. Determination of the modulus of elasticity of concrete for flexural strength tests is defined by the standard ČSN 73 6174, while the static modulus of elasticity in compression is regulated by the standards ČSN EN 12390-13 and ČSN ISO 1920-10, which are based on a similar approach, but differ in important parameters affecting the value of the modulus of elasticity. The basic parameters of the comparison are information on the recommended test specimens, the limit values of the strain on individual, requirements for testing and measuring equipment. The modulus of elasticity value is most affected by the measuring length of the base together with the lower and upper loading levels. The results of the findings are presented together with a recommendation and a possible modification of the parameters for more accurate results of the modulus of elasticity values.

KEYWORDS

Concrete • Modulus of Elasticity • Czech Standards • Lower Stress

1. ÚVOD

Výslednou hodnotu modulu pružnosti ovlivňují technologické a zkušební vlivy. Článek je primárně zaměřen na ucelený náhled zkušebních vlivů a postupů z pohledu použité zkušební normy pro statickou zkoušku modulu pružnosti, mezi které lze zařadit velikost a tvar zkušebního tělesa, použitý zkušební snímač, měřicí základna, konstrukce snímače, vliv zkušebního lisu, excentricita vzorku vůči rovnoměrnému zatěžování, způsob získávání zkušebního tělesa. Aktuálně lze měřit hodnoty modulu pružnosti betonu celkem podle pěti zkušebních metod uvedených ve třech platných zkušebních normách.

Zkušební vlivy by měly být podchyceny v normách pomocí přesně definovaných okrajových podmínek. Dle zkušeností autora jsou některé zkušební vlivy více známé, některé nejistoty měření vychází z volnějšího výkladu požadavků v normách (existují různé konstrukce a mechanismy zkušebních lisů, měřících čidel a jednotek, které splňují požadavky, ale vzájemně se mohou lišit) spolu s přípustným intervalem definovaných hodnot, s jinými zkušebními vlivy nemusí být vůbec uvažováno, jelikož se předpokládá provedení zkoušky dle normou stanoveného postupu.

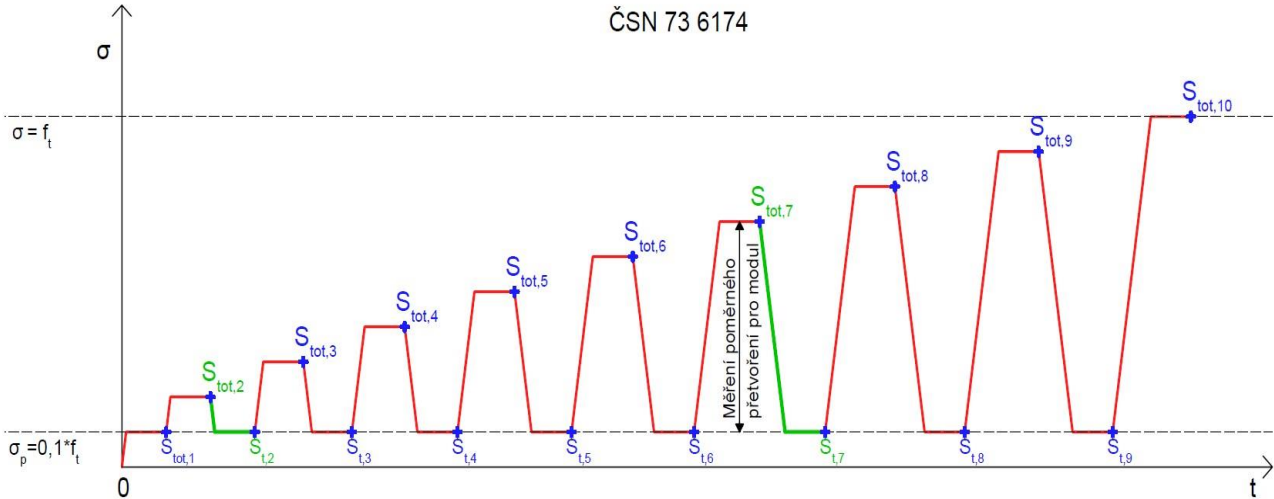
Jsou popsány a porovnány jednotlivé normové zkušební postupy doplněné o komentáře možných nejistot.

2. STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI ZE ZKOUŠEK V TAHU OHYBEM

2.1. Norma ČSN 73 6174

Zkouška je realizována dle ČSN 73 6174, podle které je stanoven modul pružnosti a modul přetvárnosti betonu namáhaného napětím v tahu ohybem pomocí výpočtu z naměřeného průhybu trámce, který je zatěžován dvěma břemeny ve třetinách rozpětí tzv. čtyřbodovým ohybem. Trámec se vkládá do lisu stejným způsobem jako při zkoušce pevnosti v tahu ohybem dle ČSN EN 12390-5, ovšem na zkušební těleso se umísťuje průhyboměr.

* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.



Obrázek 1: Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN 73 6174 s popisem měřených hodnot průhybu.

Doporučeným průhyboměrem je tuhá kovová tyč v délce zkoušeného trámce, která je pevně podepřena dvěma hroty nad jednou opěrou a podepřena hrotem v polovině rozpětí. Nad druhou opěrou je umístěn snímač průhybu, který měří dvojnásobné průhyby trámce uprostřed rozpětí. Přesnost přístrojového vybavení měřící průhyb trámce musí být minimálně na 0,001 mm. Může se jednat o ověřený ruční snímač průhybu nebo snímač s automatickým zápisem hodnot.

Doporučeným zkušebním tělesem je tráмец o rozměrech 150 × 150 × 700 mm, lze použít i trámce o rozměrech 150 × 150 × 600 mm nebo 100 × 100 × 400 mm. Zkušební těleso je cyklicky zatěžováno po stupních silami F_1 až F_n , které vyvozuji napětí zvyšující se po 10 % z předpokládané pevnosti v tahu ohybem R_i (viz obrázek 1). Po každém zvýšení se určí hodnota průhybu a zatížení se vrací na základní úroveň zatížení F_1 s odečtením průhybu. Plynulé cyklické zatěžování a odlehčování se provádí rychlostí 250 N/s ± 30 N/s. Modul pružnosti se zpravidla určuje pro napětí rovné 2/3 pevnosti v tahu ohybem (rovnice 1), lze však vyhodnocovat jednotlivé zatěžovací stupně. Naměřené moduly pružnosti se liší o zhruba 20 % oproti statickým modulům pružnosti betonu v tlaku (Huňka, 2014).

$$E = \frac{F \cdot l}{f_{e,7} \cdot b \cdot h} \left(0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46 \right) \quad (1)$$

2.2. Komentář k metodě

Dle zkušeností se metoda téměř nepoužívá pro stanovení statického modulu pružnosti, o čemž napovídá i rok vydání normy (1994), kdy během bezmála třicetileté platnosti nepřišla žádná aktualizace. Norma obsahuje technické nedostatky, mezi které lze zařadit nedostatečnou specifikace zatěžovacích cyklů (není specifikován časový interval pro odečtení hodnoty průhybu), pro zjednodušení výpočetního vztahu je dosazena konstantní hodnota Poissonova čísla ($\mu = 0,15$), špatně uvedený vztah pro výpočet pružného průhybu uprostřed. Důvod pro nepoužívání lze dle autora spatřovat v časové náročnosti cyklování. Zkouška může poskytnout trochu jiný náhled na hodnotu modulu pružnosti než běžné statické tlakové zkoušky, ke kterým může být vhodným doplňkem charakteristiky.

3. STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI ZE ZKOUŠEK V TLAKU

3.1. Norma ČSN 12390-13

Norma ČSN EN 12390-13 specifikuje dvě metody pro stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku a umožňuje zkoušet modul pružnosti podle dvou metod. Doporučeným referenčním zkušebním vzorkem je válec o průměru 150 mm a výšce 300 mm, případně vzorek splňující štíhlostní poměr (tedy poměr výšky L a příčného rozměru d) v mezích 2 až 4. V případě vývrtů tento poměr nelze vždy splnit a v poznámce je uvedeno, že tento fakt může mít vliv na výslednou hodnotu modulu pružnosti.

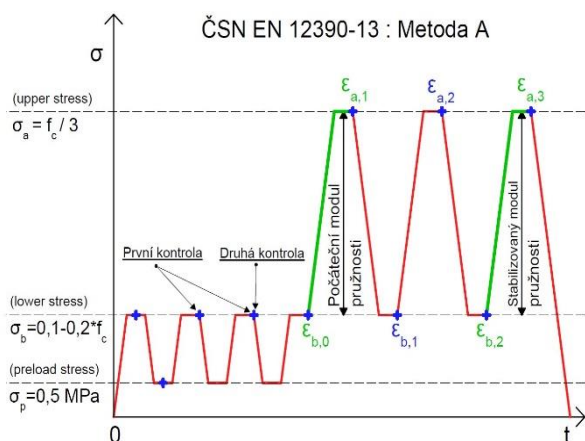
Čidla na měření deformace musí být umístěna tak, aby měřící základna byla v ekvivalentní vzdálenosti od čelních ploch vzorku a zároveň musí být uspořádány symetricky vzhledem ke středové ose vzorku. Předpis požaduje nejméně dvě čidla pro měření deformace, ovšem pro získání odpovídajících informací o vystředění vzorku doporučuje, aby byla vyžadována alespoň tři čidla pro měření deformace. Měřící délka základy l_0 musí být mezi dvěma třetinami průměru vzorku d a jednou polovinou délky vzorku L . U zkušebních vzorků se štíhlostním poměrem mezi 3,5 a 4,0 lze měřící základnu l_0 zvětšit až na $2/3 \times L$. Požadovaná rozlišovací schopnost přístrojového vybavení v absolutní hodnotě je 2 μm .

Pro stanovení předpokládané pevnosti betonu v tlaku musí být použity vzorky stejné velikosti, tvaru a dávky betonu jako požité pro stanovení modulu pružnosti. V případě jádrových vývrtů musí být všechny vzorky ze stejné zóny. Pokud nejsou k dispozici doprovodná tělesa pro určení tlakové pevnosti betonu, lze pevnost v tlaku odhadnout na základě nedestruktivních zkoušek dle národních předpisů. Horní napětí zatěžovacího cyklu σ_a je definováno jako $1/3 \times f_c$.

Rychlost zatěžování zkušebního lisu je definována $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$ s požadavkem udržování zvolených napětí v rozmezí $\pm 5 \%$ jmenovité hodnoty napětí. Výsledná hodnota modulu pružnosti se zaokrouhuje na nejbližších 0,1 GPa. Zjištěná pevnost zkušebního tělesa by se neměla lišit od předpokládané pevnosti betonu v tlaku f_c o více než 20 %.

3.1.1. Metoda A

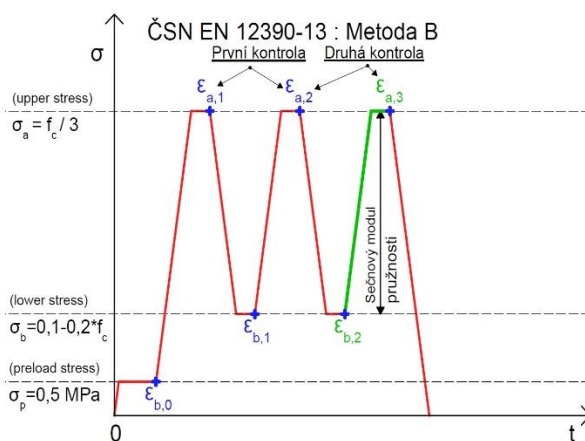
Slouží ke stanovení počátečního a stabilizovaného sečnového modulu pružnosti. **Metoda A** používá pro cyklování tři zatěžovací úrovně a definuje dvě kontrolní podmínky, které se nachází v předzatěžovacích cyklech. První kontrola se zaměřuje na správnost měření a upevnění měřicího čidla na vzorku v předzatěžovací fázi mezi druhým a třetím cyklem, kde nesmí být změna ϵ_b na každém čidle větší než 10 %. Druhá kontrola řeší správnost centraxe zkušebního tělesa ve zkušebním lisu, kde deformace ϵ_b na všech měřicích čidlech se nesmí lišit od jejich průměru o více než 20 %.



Obrázek 2: Průběh zatěžovacích cyklů pro Metodu A dle ČSN EN 12390-13.

3.1.2. Metoda B

Metoda B je tvořena ze třech zatěžovacích cyklů a stanovuje pouze stabilizovaný sečnový modul pružnosti betonu ve třetím zatěžovacím cyklu a má principiálně identické kontroly centraxe jako metoda A.



Obrázek 3: Průběh zatěžovacích cyklů pro Metodu B dle ČSN EN 12390-13.

3.2. Komentář k metodě

V normě není dle autora dostatečně specifikované vhodné použití dané metody pro zkušební postup. Z kontextu lze vyčíst, že rozdíl v hodnotě počátečního a stabilizovaného sečnového modulu pružnosti může být ukazatelem náchylnosti materiálu

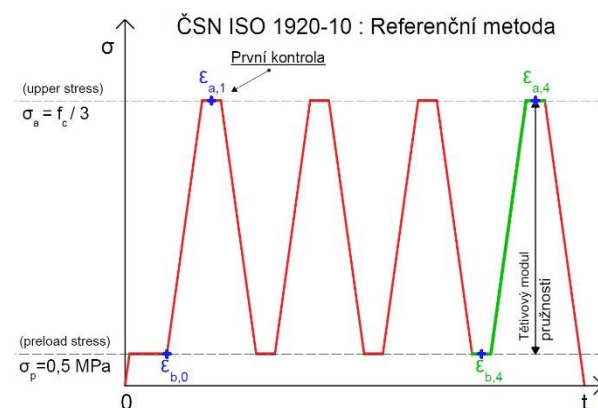
k mikrotrhlinám způsobených působícím napětím nebo mikrotrhlinám způsobeným vrtáním v případě jádrových vývrtů a **metoda A** je tedy jeví vhodnější pro zkoušení modulu pružnosti jádrových vývrtů. Z pohledu zkušebních vlivů je v normě velmi správně kladen důraz na správnou centraci vzorku. V roce 2022 přišla aktualizace normy, která doporučuje používat tři čidla, pro zachycení vlivu excentrického zatěžování v obou hlavních osách. Dle autora není v normě dostatečně řešeno vliv připevnění snímacích čidel pro měření poměrného přetvoření, kde může dojít ke zkreslení hodnot změn délky, což má vliv na výslednou hodnotu modulu pružnosti.

3.3. Norma ČSN ISO 1920-10

Stanovený modul pružnosti dle normy ČSN ISO 1920-10 odpovídá tečně křivky vztahu mezi napětím a přetvořením. Pro účely návrhu modulu pružnosti je uvažován ekvivalent tětivového modulu přetvoření. Norma uvádí dva postupy zatěžování pro stanovení hodnoty modulu pružnosti. Referenční metoda vychází z cyklického zatěžování zkušebního vzorku, alternativní metoda plynule přitěžuje zkušební těleso do porušení.

3.3.1. Referenční metoda

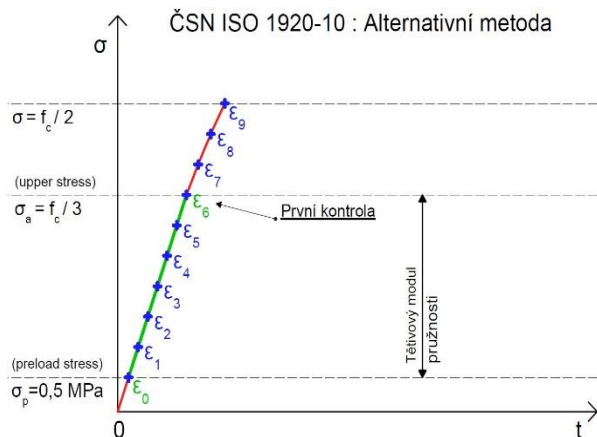
Referenční metoda principiálně používá podobný přístup k zatěžování zkušebního tělesa a kontrole správné centraxe jako ČSN EN 12390-13 **Metoda B**, ovšem zahrnuje čtyři zatěžovací cykly, kde v prvním cyklu se kontroluje správná centraxe vzorku a v závěrečném cyklu stanovuje hodnota modulu pružnosti. Základní hodnota napětí je oproti metodě B nižší ($\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$), horní zatěžovací napětí je definované stejnou hodnotou $\sigma_a = (f_c / 3)$. Kontrola definuje jednu podmínku, že pokud nejsou jednotlivá přetvoření na čidlech v rozmezí $\pm 20 \%$ od své průměrné hodnoty σ_a , je nutné opravit centraci zkušebního tělesa a opakovat zkoušku. Přesnost přístrojového vybavení musí být $\pm 5 \times 10^{-6}$, pro měřicí základny o délce větší nebo rovné 100 mm mohou mít přesnost $\pm 10 \times 10^{-6}$. Přístroje pro měření deformace předpis uvádí (např. např. zrcátkový nebo hodinkový deformometr, odporový tenzometr, indukční tenzometr, strunový tenzometr). Doporučeným zkušebním tělesem je pro oba postupy válec o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Rychlost zatěžování zkušebního lisu je shodně definována v rozmezí 0,2 až 0,6 MPa/s a výsledná hodnota modulu pružnosti se vyjadřuje v GPa na 3 platné číslice.



Obrázek 4: Průběh zatěžovacích cyklů pro Referenční metodu dle ČSN ISO 1920-10.

3.3.2. Alternativní metoda

V případě, že přetvoření a napětí na zkušebním tělese jsou průběžně měřeny během zatěžovacího cyklu, lze pokračovat v zatěžování do hodnoty pevnosti v tlaku bez zastavení na horním zatěžovacím cyklu. Těleso se centricky vloží do zkušebního lisu a vyvodí základní napětí jako u Referenční metody ($\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$). Napětí se plynule zvyšuje až do hodnoty 0,5 zatížení na mezi porušení, během čehož musí být minimálně desetkrát zaznamenány hodnoty z čidel. Pokud nejsou jednotlivá přetvoření v rozmezí 30 % své průměrné hodnoty, musí se tato skutečnost napsat do protokolu.



Obrázek 6: Průběh zatěžovacích cyklů pro Alternativní metodu dle ČSN ISO 1920-10.

3.4. Komentář k metodě

Referenční metoda je principiálně velmi podobná **Metodě B** dle ČSN EN 12390-13. Hodnota modulu pružnosti je určena až ve čtvrtém cyklu (Metoda B používá tři cykly), což z pohledu cyklování zatížení by nemělo mít velký vliv na hodnotu modulu pružnosti, ovšem používá nižší dolní zatěžovací úroveň, což může mít vliv na výslednou hodnotu modulu pružnosti. Metoda zmiňuje možnost lepení měřicích čidel na vzorek, což může zvýšit přesnost měření.

Alternivní metoda používá jako horní zatěžovací úroveň skutečnou třetinu tlakové pevnosti betonu, což u všech předchozích metod nemusí nastat, jelikož hodnota tlakové pevnosti je určována na separátních tělesech a použita jako výchozí hodnota pro testovaná tělesa na modul pružnosti, na který je tlaková pevnost určována až po zkoušce. Dle zkušeností se jedná o velmi málo používanou metodu, jelikož je možnost porušení měřicích čidel při vyšších zatěžovacích úrovních. Při kontinuálním zápisu hodnot poskytuje komplexnější charakteristiku chování betonu zatíženého tlakem.

4. DISKUSE

Z možných nastíněných zkušebních vlivů je v normách velmi dobře podchycen vliv excentrického zatěžování. Pro přesnější hodnoty modulu pružnosti lze zpřisnit rozdíly naměřených posunů na jednotlivých čidlech na maximální hodnotu 10 % od jejich průměrné hodnoty. Horní zatěžovací úroveň je pro všechny metody shodně definovaná, ovšem dolní zatěžovací hranice je rozdílná a tento rozdíl může poskytnout rozdílné

hodnoty modulu pružnosti. Jistá nejistota může vznikat v určení tlakové pevnosti betonu na separátních tělesech s následnou aplikací na testovaná tělesa. Na tuto skutečnost reaguje Alternativní metoda, která díky kontinuálnímu zápisu dat i po překročení horní zatěžovací úrovně dokáže správně určit zatěžovací úroveň a bylo by vhodné se touto metodou dále zabývat. Z tohoto pohledu je mnohem výhodnější určení hodnoty modulu pružnosti ze zkoušky tahu ohybem, kde se zatížení zvyšuje po 10 % a je zaznamenáván celý průběh pracovního diagramu. Z pohledu přístrojového vybavení je velmi správně požadovaná přesnost přístrojového vybavení pro všechny postupy od 1 do 2 μm spolu s požadavkem na platnou kalibraci zkušebního lisu.

5. ZÁVĚR

Budoucí vývoj práce by se měl zaměřit na určení modulu pružnosti ze zkoušky v tahu ohybem, která poskytuje kompletní pracovní diagram zkoušky a zároveň udává doplňující charakteristiku k nejčastěji používané metodě určení modulu pružnosti betonu v tlaku. Za použití modernějších měřicích zařízení se více zaměřit na Alternativní metodu, která poskytuje komplexnější charakteristiku chování betonu zatíženého tlakem a realizovat kompletní porovnání jednotlivých zkušebních postupů.

ACKNOWLEDGEMENTS

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu SGS22/091/OHK1/2T/11 a SGS22/090/OHK1/2T/11.

Reference

- ČSN 73 6174: Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem (1994). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12390-13: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku (2021). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12390-13: Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku (2016). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles (2020). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- Huňka, P. (2014), Modul pružnosti – možnosti stanovení, technologické a zkušební vlivy, Disertační práce.
- Kocáb, P. (2016), Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod, Disertační práce.